

TIEMPO ⁽¹⁾

El tiempo es una cantidad física que puede observarse y medirse con un reloj de naturaleza física, mecánica o eléctrica. El tiempo es una componente de muchas formulas matemáticas y funciones físicas. Es uno de varios conceptos elementales que sirven de base para muchos sistemas de medición de fenómenos físicos. Otros conceptos son, por ejemplo, la longitud, la temperatura, y la masa de un objeto.

Las definiciones del diccionario nos dan una idea sobre el tiempo:

- Tiempo: es un continuo no espacial en el cual ocurren eventos en una sucesión aparentemente irreversible desde el pasado, presente y hacia el futuro.
- Tiempo: el periodo durante el cual una acción o proceso ocurre; un momento definido, hora, día, año indicado por un reloj o calendario.

Un aspecto importante que contribuye a no comprender bien el significado de tiempo es que usamos una sola palabra, tiempo, para referirnos a dos conceptos distintos:

- el primero es fecha o cuando ocurre un evento,
- el segundo es intervalo de tiempo o lapso de tiempo entre dos eventos.

Esta distinción es importante y resulta básica para los problemas involucrados al medir el tiempo.

⁽¹⁾ **Astronomía Básica**, 2000, Fondo de Cultura Económica, México, D.F

PROBLEMA DE LA MEDIDA DEL TIEMPO

GENERALIDADES:

El problema de la medida del tiempo consiste en hallar una unidad de tiempo que sea constante e invariable. Este problema esta ligado directamente al espacio recorrido y no a la velocidad. Desde el punto de vista astronómico, los elementos de referencia son los astros (su recorrido), lo que se traduce en el estudio de los ángulos sobre la esfera celeste.

Se trata de hallar una correspondencia entre estos recorridos con elementos independientes a estos, como lo son: los espacios recorridos por las agujas del reloj, las oscilaciones atómicas y/o moleculares (reloj atómico del cesio-133).

Todo esto ha tenido una gran evolución debida al avance de los instrumentos de medida y conservación del tiempo, lo que hizo que se distinguieran tres clases o escalas de tiempo de acuerdo al reloj patrón que se adopte (cada uno relacionado con un fenómeno natural).

1) El **reloj patrón** desde la más remota antigüedad fue el **movimiento de rotación de la Tierra**. Esto implicó dos tipos de tiempo:

- Si el astro en cuestión es el Sol, hablamos del TIEMPO SOLAR VERDADERO ($TSV = t_{\text{solar v}}$) y el día solar corresponde al intervalo de tiempo entre dos culminaciones sucesivas en el mismo meridiano.
- Si el astro de referencia son las estrellas y/o Aries, tendremos el TIEMPO SIDÉREO (θ). El día sidéreo corresponderá al intervalo de tiempo en que el ángulo de Aries se incrementa 24 horas respecto al semi-meridiano superior.

2) Las observaciones astronómicas detectaron una falta de uniformidad en el movimiento de rotación de la Tierra, por lo que se adoptó como **reloj patrón**, a partir de 1960, el **movimiento de traslación de la Tierra**. Surge así el TIEMPO EFEMÉRICO (TE) y se define el segundo efemérico como 1/31556926 del año trópico de 1900.

Esta escala de tiempo se basa en los estudios realizados por Newcomb sobre el Sol.

Efemérides {
Hasta 1960: Calculadas en función del tiempo universal
Después de 1960: Calculadas en función del tiempo efemérico.

3) Cuando el **reloj patrón** se corresponde con el **reloj atómico**.

Paralelo a este proceso, los adelantos en mecánica, electromagnetismo, etc., propician el surgimiento de los relojes atómicos y se adopta el TIEMPO ATÓMICO INTERNACIONAL (TAI). El segundo atómico se corresponde con 9.192.631.770 ciclos de la radiación asociada a la transición hiper fina desde el estado de reposo del isótopo de cesio-133. En el año 1967 la Oficina de Pesas y Medidas adoptó este segundo atómico como unidad de tiempo en el Sistema Internacional de Unidades Físicas (S.I.).

La precisión de los relojes atómicos (10^{-12}) es tan elevada que admite únicamente un error de un segundo en 30.000 años. El reloj más preciso del mundo se diseña en el Observatorio de París.

A partir del 1 de Marzo de 1984, se adopta un tiempo llamado TIEMPO DINÁMICO TERRESTRE (TDT) o TIEMPO TERRESTRE (TT), corresponde a la escala de tiempo de las efemérides geocéntricas aparentes de los astros y el origen corresponde al baricentro de la Tierra (centro de masas).

El TDT se ligó al TIEMPO ATOMICO INTERNACIONAL a través de la siguiente relación:

$$\text{TDT} = \text{TAI} + 32^{\text{s}},184.$$

A su vez surge otra nueva escala de tiempo llamada TIEMPO DINÁMICO BARICENTRICO (TDB) basado en las teorías dinámicas del sistema planetario. El TDB esta referido al baricentro de nuestro sistema planetario.

Según el punto de referencia considerado, se obtendrán las distintas definiciones de día.

Día Verdadero:

Punto de referencia: Sol Verdadero, que es el que recorre el plano de la Eclíptica, que se intersecta con el plano del Ecuador según la línea de los equinoccios.

Intervalo de tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del sol verdadero por el meridiano superior del lugar

Día Medio:

Punto de referencia: Sol Medio, totalmente ideal, que se mueve sobre el plano del Ecuador, con movimiento constante y obligado a coincidir con el solo ficticio en los puntos γ y Ω .

Intervalo de tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del Sol Medio por el meridiano del lugar.

Día Sidéreo:

Punto de referencia: punto Aries (intersección del plano del Ecuador con el de la Eclíptica)

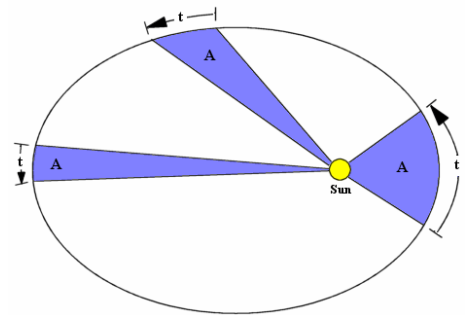
Intervalo de tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos por el meridiano del lugar, del punto Aries.

TRATAMIENTO CLÁSICO DE LA MEDIDA DEL TIEMPO

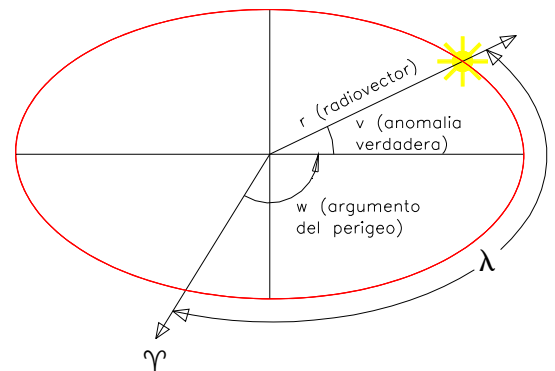
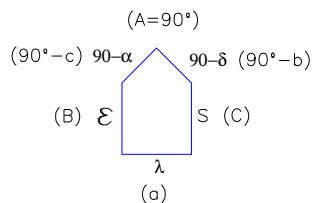
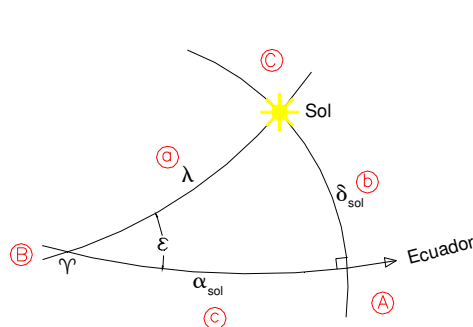
El movimiento del Sol sobre la Eclíptica no es constante y se ve afectado por dos irregularidades:

1) Explicada a través de la 2da. Ley de Kepler.

El sol verdadero describe su movimiento sobre la Eclíptica de forma tal, que no es constante. En el perigeo va más rápido que en el apogeo, lo que se explica a través de la segunda ley de Kepler. Las áreas barridas por los radio-vectores de los planetas son directamente proporcionales al tiempo que tardan en recorrerlas, o sea, que las velocidades sectoriales son constantes.



$$\frac{\text{Área } (A_1)}{t_1} = \frac{\text{Área } (B_1)}{t_2} = \dots = \text{cte.}$$



Resolviendo el triángulo esférico y aplicando la Segunda Ley de Kepler podemos arribar a las siguientes expresiones:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\cos \epsilon}{1 - \sin^2 \epsilon \cdot \sin^2 \lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dt}$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{n \cdot (1 + e \cdot \cos(\lambda - \omega))^2}{(1 - e^2)^{3/2}}$$

Donde:

α = ascensión recta

λ = longitud celeste

ω = argumento del perigeo

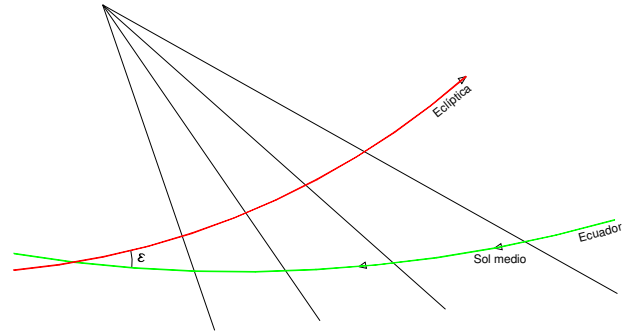
ϵ = oblicuidad de la Eclíptica

n = movimiento medio del planeta ($n = 2\pi/P$, siendo P el periodo)

DOCENTE: Ing. Agrim. Magali Martinez.

2) Explicada a causa de la oblicuidad de la Eclíptica.

Se corrige el movimiento del Sol (Sol ficticio) para que recorra sobre la Eclíptica, espacios iguales en tiempos iguales, pero la proyección de este Sol Ficticio en el Ecuador, también debo corregirla. Por efecto de la oblicuidad aparece el movimiento medio del Sol en el Ecuador. Se define así el Sol Medio como el Sol Ficticio que recorre el Ecuador Celeste en forma regular (arcos iguales en tiempos iguales), o sea que el Sol Medio es el movimiento sobre el Ecuador Celeste en forma constante.



$t = \text{ángulo solar}$

Tiempo solar medio:

Tiempo solar verdadero:

$$TSM = t_{\text{sol medio}}$$

$$TSV = TSM + \Sigma I = t_{\text{sol verdadero}}$$



Suma de irregularidades, están incluidas las dos irregularidades nombradas anteriormente; representa una ECUACIÓN DE TIEMPO (E_t)

$$E_t = TSV - TSM = t_{\text{sol v}} - t_{\text{sol m}}$$



Corresponde a la diferencia de dos ángulos horarios, o sea, la diferencia de dos ascensiones rectas (con signo contrario).

Además, las diferencias horarias son iguales a las diferencias de longitudes: $\alpha_{\text{sol m}} = \lambda_{\text{sol m}}$

$$E_t = t_{\text{sol v}} - t_{\text{sol m}} = \alpha_{\text{sol m}} - \alpha_{\text{sol v}}$$

$$E_t = (\alpha_{\text{sol m}} - \alpha_{\text{sol v}}) + \lambda_{\text{sol v}} - \lambda_{\text{sol v}}$$

$$E_t = (\lambda_{\text{sol v}} - \alpha_{\text{sol v}}) + (\alpha_{\text{sol m}} - \lambda_{\text{sol v}})$$



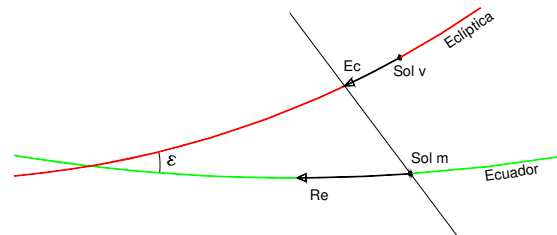
Re

(Reducción al Ecuador)



Ec

(Ecuación del Centro)



$$E_t = Ec + Re$$

Donde:

$$Re = (1/2).tg^2(\epsilon/2).sen(2\lambda) - (1/4).tg^4(\epsilon/2).sen(4\lambda) - (1/6).tg^6(\epsilon/2).sen(6\lambda) \dots$$

$$Ec = q_1.sen(\lambda) + q_2.cos(\lambda) + q_3.sen(2\lambda) + q_4.cos(2\lambda) \dots$$

$$q_i = f(e^n.sen(n\lambda)) \text{ o } q_i = f(e^n.sen(n\lambda)), \text{ con } n=1, 2, 3, 4$$

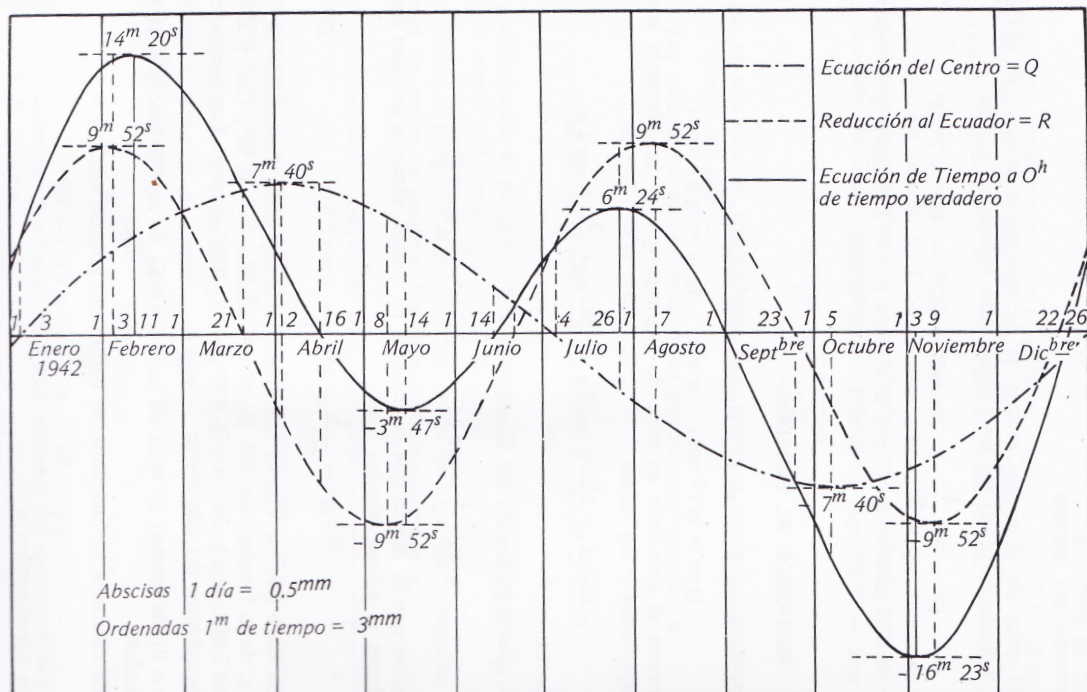
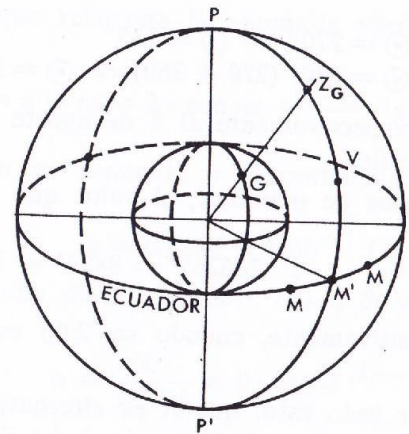
$$E_t = A sen(nt) + B cos(2nt)$$

Podemos así saber lo que adelanta o atrasa el Sol Medio respecto del Sol Verdadero. De igual forma podemos entonces fijar el momento en que el Sol Medio pasa por el meridiano, ya que dicho sol es el que sirve para la medida de la hora.

La ecuación del tiempo nos indicara la posición del Sol Medio (M) (adelantado o atrasado) al momento en que el Sol Verdadero (V) pase por el meridiano de Greenwich.

Recordemos que tanto el Día Medio como el Día Verdadero comienzan en el momento preciso en que el Sol Medio o el Sol Verdadero respectivamente pasan por el meridiano superior.

En la gráfica de $E_t=f(t)$, donde t representa la fecha, se puede observar la Ecuación del Centro, la Reducción al Ecuador y la Ecuación del Tiempo.



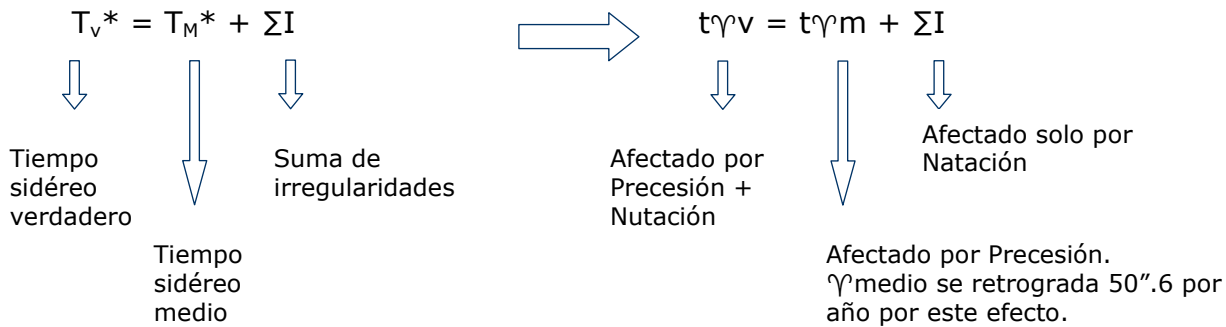
FORMULA PRÁCTICA DE LA ECUACIÓN DEL TIEMPO:

$$E_t^{0^{\circ} \text{ TDT}} = \theta_{GR}^{0^{\circ} \text{ TU}} + 12 - \alpha_{\text{sol v}}^{0^{\circ} \text{ TDT}}$$

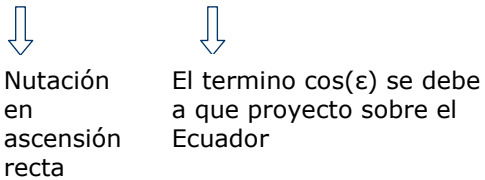
TIEMPO SIDÉREO:

Corresponde al ángulo horario del punto Aries ($t\gamma$).

También sufre irregularidades. El punto Aries esta afectado de dos fenómenos: PRECESION (P) y NUTACIÓN (N), por lo que dicho punto no permanece invariable en el espacio, sino que se *retrograda*, lo que determina también que el día sendereo tampoco sea constante.



$$N_a = (N + dN) \cdot \cos(\epsilon) = E_q$$





$$T_v^* = T_M^* + E_q$$

CLASES DE AÑOS

(A) AÑO SIDEREO:

Intervalo de tiempo en que la ascensión recta del sol medio se incrementa 360° (o 24h) respecto del Aries fijo.

Tiempo que el Sol emplea en coincidir des veces con la misma estrella.

Valor: $365 \text{ días}, 2563607 + 12 \cdot 10^{-8} \cdot t$ t expresada en fecha juliana.

Variación por siglo: $(12 \cdot 10^{-8} \cdot t) / 86400 \text{ s} = 0 \text{ s}, 01 / \text{siglo juliano}$

No se puede determinar por observaciones, ya que esto requeriría poder materializar un punto fijo sobre la esfera celeste.

(B) AÑO TRÓPICO: (O AÑO ASTRONÓMICO)

Intervalo de tiempo en que la ascensión recta del Sol corregido o Sol medio se incrementa en 360° (o 24h) respecto del Aries medio (móvil, el que está afectado por Precesión).

Intervalo de tiempo entre dos pasos del Sol por el punto Aries. Mientras el Sol da una vuelta completa (sentido directo) el punto Aries se retrograda $50''$ a causa de la Precesión, o sea que encuentra al punto Aries antes de recorrer 360° . Es mas corto que el año sidéreo.

Valor: $365 \text{ días solar medio}, 24219879 + 614 \cdot 10^{-8} \cdot t$

Variación por siglo: $(614 \cdot 10^{-8} \cdot t) / 86400 \text{ s} = 0 \text{ s}, 130 / \text{siglo juliano}$

Este es el que se utiliza para el calendario, pues es el que rige las estaciones.

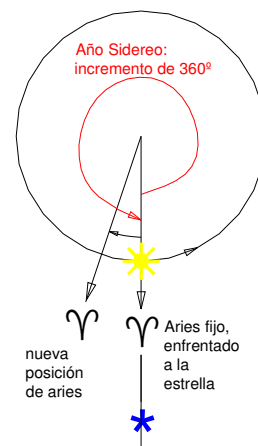
El instante en que el Sol pasa por Aries se puede determinar con mucha precisión ya que en ese momento, la declinación es nula ($\delta=0$).

(C) AÑO ANOMALÍSTICO:

Intervalo de tiempo en que el Sol pasa dos veces consecutivas por el Perigeo. Es mas largo que el año Sidéreo, pues el Perigeo posee un movimiento en sentido directo de $11'', 7$ anuales.

Valor: $365 \text{ días solar medio}, 2596413 + \dots\dots\dots$

No se puede determinar mediante observaciones por la imposibilidad de determinar el momento justo en que el Sol pasa por el Perigeo.



AÑO TRÓPICO < AÑO SIDEREO AÑO < ANOMALÍSTICO

Año	Referencia	Recorrido	Duración
Trópico	Aries	$365^\circ 59' 9,8''$	365.2422
Sidéreo	Estrella	360°	365.2564
Anomalístico	Perigeo	$360^\circ 0' 11,6''$	365.2596

Tabla ²

(2) <http://www.masmar.net/esl/Guias/Apuntes-Nauticos/Manual-Navegacion/Manual-de-Navegacion-Astronomia-10/>

TRANSFORMACION ENTRE TIEMPO SOLAR MEDIO Y TIEMPO SIDEREO

En 365,2422 días solares medios, la ascension recta del sol (α_{sol}) se incrementa en 24h respecto del Aries medio móvil.

$$\begin{aligned} 365,2422 \text{ d sol m} &\longrightarrow \alpha_{sol} \text{ incrementa } 24h^* \\ 1 \text{ d sol m} &\longrightarrow x h^* \end{aligned}$$

$$x h^* = (1 \text{ d sol m}) \cdot (24h^*) / 365,2422 \text{ d sol m} = 3^m 56^s,56^*$$



$$\begin{aligned} 1 \text{ d sol m} &= 1 d^* + (3^m 56^s,56^*)^* = 24^h 3^m 56^s,56^* \\ 1 d^* &= 1 \text{ d sol m} - (3^m 56^s,56^*)^* \end{aligned}$$

Debo expresarlo en días sol m

$$\begin{aligned} 24^h 3^m 56^s,56^* &\longrightarrow 24 \text{ h sol m} \\ 3^m 56^s,56^* &\longrightarrow x \text{ h sol m} \end{aligned}$$

$$x \text{ h sol m} = (3^m 56^s,56^*) \cdot (24 \text{ h sol m}) / 24^h 3^m 56^s,56^* = 3^m 55^s,9 \text{ sol m}$$



$$1 d^* = 1 \text{ d sol m} - (3^m 55^s,9 \text{ sol m}) = 23^h 56^m 4^s,1 \text{ sol m}$$

Aplicando lo anterior podemos llegar a la siguiente generalizacion:

Intervalo solar medio ($I_{sol m}$) $\leftrightarrow$ Intervalo sidéreo (I^*)

$$\frac{I^*}{I_{solar medio}} = \frac{24 h^* + 3^m 56^s,56}{24 h^m}$$



$$I^* = (1,00273790934) \cdot (I_{solar medio})$$

$$\frac{I_{solar medio}}{I^*} = \frac{24 h^* - 3^m 55^s,9}{24 h^*}$$



$$I_{sol medio} = (0.99726956634) \cdot (I^*)$$

TIEMPO MEDIO CIVIL: ($T_{m civil}$)

Es el ángulo horario del sol medio respecto de un meridiano, incrementado en 12 horas.

$$TU = t_{sol medio} + 12h$$

TIEMPO MEDIO CIVIL DE GREENWICH:

Es llamado tambien Tiempo Universal (TU). Corresponde a la hora civil de Greenwich referida al sol medio.

$$TU = t_{sol medio}^{GR} + 12h$$

HORA LEGAL:

El "día medio" corresponde al tiempo transcurrido a partir de que el Sol pasa por el meridiano superior del lugar. Se definió el "día civil", de igual duración al anterior pero con la particularidad de que su comienzo es a partir del momento en que el Sol pasa por el antemeridiano (meridiano inferior), para lograr así que el cambio de fecha (directamente relacionado con la hora) se realice por la noche y no durante el día.

Es así entonces que la "hora civil" es local a cada lugar.

En Washington en el año 1884 y posteriormente en París en el año 1912, en la Conferencia Internacional de la Hora se adoptó el sistema de *husos horarios*. Mediante este sistema se divide a la superficie de la Tierra en 24 husos correspondientes cada uno a 15° y como meridiano central del huso correspondiente a la hora 0, al meridiano de Greenwich. La hora oficial será igual para cada punto del planeta perteneciente del mismo huso. Existe la llamada "línea de cambio de fecha" en algunos lugares, donde el huso no es precisamente quien separa la fecha sino una línea imaginaria que permite dejar íntegramente de un lado u otro de ella, países o islas enteras.

$$T_{m \text{ civil}} (\text{Montevideo}) = t_{\text{sol medio}}^{\text{Montevideo}} + 12h$$

$$T_{m \text{ civil}} (\text{Greenwich}) - T_{m \text{ civil}} (\text{Montevideo}) = (t_{\text{sol medio}}^{\text{Greenwich}} + 12h) - (t_{\text{sol medio}}^{\text{Montevideo}} + 12h) =$$

$$T_{m \text{ civil}} (\text{Greenwich}) - T_{m \text{ civil}} (\text{Montevideo}) = t_{\text{sol medio}}^{\text{Greenwich}} - t_{\text{sol medio}}^{\text{Montevideo}}$$

$$\underbrace{\quad}_{TU} - T_{m \text{ civil}} (\text{Montevideo}) = t_{\text{sol medio}}^{\text{Greenwich}} - t_{\text{sol medio}}^{\text{Montevideo}}$$

$$TU - T_{m \text{ civil}} (\text{Montevideo}) = (\theta_{GR} - \alpha_{\text{sol medio}}) - (\theta_i - \alpha_{\text{sol medio}}) = \theta_{GR} - \theta_i = \Delta\alpha$$

HORA LEGAL:

$$\text{Hora Legal (HL)} = TU \pm \text{huso}$$

HORA LEGAL URUGUAY:

$$HLU = TU - 3h$$

TRANSFORMACION ENTRE HORA LEGAL Y HORA SIDEREA

Hora Legal (HL) ↔ Hora sidérea (θ)

$$\theta_L = \underbrace{(HLU + 3h)}_{TU} \cdot \underbrace{(1.00273790934)}_{I^*} + \theta_{GR}^{0hTU} - \lambda$$

$$\underbrace{\quad}_{\theta_{GR}^{TU}}$$

$$HLU = \underbrace{(\theta_L + \lambda - \theta_{GR}^{0hTU})}_{TU} \cdot \underbrace{(0.99726956634)}_{I^*} - \text{huso}$$

$$\underbrace{\quad}_{I \text{ solar medio} = TU}$$

NUEVAS ESCALAS DE TIEMPO ASTRONÓMICO

TE: Tiempo efemérico
TDT: Tiempo dinámico terrestre
TDB: Tiempo dinámico baricéntrico
TAI: Tiempo atómico internacional

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = f_1(t) \\ \delta = f_2(t) \end{array} \right\} \Rightarrow \text{tiempo } t = f(\alpha, \delta)$$

Todo cuerpo móvil puede considerarse como un reloj en el sentido más amplio de la palabra. Cada cuerpo móvil establece una escala de tiempo.

Las distintas escalas de tiempo deben cumplir un requisito fundamental: ser compatibles entre sí, o sea, que para el mismo instante deben dar el mismo valor de t .

Entonces podemos decir que cada astro cuyo movimiento se conoce (o sea que se han integrado sus ecuaciones de movimiento) constituye un reloj. Los cuerpos celestes moviéndose bajo la acción de fuerzas distintas respecto a un sistema de referencia absoluto (sistema galileano) también deben definir escalas de tiempo compatibles entre sí.

Longitud diaria: $L = L_0 + n \cdot t$

$n = 2\pi/\text{período}$, relacionado con el movimiento del cuerpo.
 t = intervalo de tiempo transcurrido.

Aplicando progresión aritmética de razón a con t términos, obtenemos

$$L^{\text{obs}} = L_0 + nt + (n \cdot a \cdot t^2)/2$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{L^{\text{calc}}}$

La variación de la unidad de tiempo provoca en el movimiento de los cuerpos celestes la aparición de una aceleración llamada aceleración ficta. Su valor es $n \cdot a$ y se obtiene como resultado de la derivada segunda de la expresión anterior.

En 1950, Nicolás Stoyko observó que en el valor de la rotación de la Tierra con respecto a la rotación media había un enlentecimiento de $0''.059$ a fines del mes de Mayo y de $0''.064$ a principios de Noviembre.

A mediados del siglo pasado, Simón Newcomb estudiando el movimiento de la Luna (que figuraba en las tablas de Hansn) durante dos siglos, notó una diferencia entre lo observado y lo calculado. Esto podría responder a un error en las tablas o un error en las observaciones, por lo que generó la hipótesis de que estaba bien la teoría pero mal el reloj patrón, o sea, el movimiento de rotación de la Tierra.

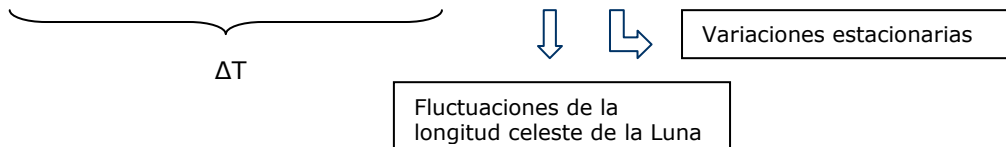
En el año 1764, Juliandre prevee también una variación de $2''$ por perturbación entre el Sol y la Luna en el movimiento de rotación de la Tierra.

➡ **Se descubren tres irregularidades en el Movimiento de Rotación de la Tierra:**

- 1) Variación secular provocada por el frenamiento tidal de las mareas terrestres.
- 2) Variaciones periódicas vinculadas al ciclo de las estaciones, deshielos, etc., lo que provoca un cambio en el momento de inercia del cuerpo.
- 3) Irregularidades (aun en estudio) llamadas variaciones irregulares aleatorias, vinculadas a la naturaleza íntima geofísica de la Tierra.

De todo esto, surge como **nuevo reloj patrón el Movimiento de Traslación de la Tierra** (año 1960), y se define el TE (tiempo de efemérides):

$$TE = TU + 24s,349 + 72^s,32 \cdot t + 29^s,949 \cdot t^2 + 1^s,821 \cdot B + S + \dots$$



$$TE = TU + \Delta T$$

$$TE = t_{\text{sol medio}}^{\text{ME}} + 12h$$

TIEMPO EFEMERICO (TE): ⁽³⁾

Dado que el movimiento de rotación de la Tierra no es uniforme, se sustituye este movimiento por el movimiento de traslación de la Tierra, que si bien tampoco es uniforme, es conocido.

No es necesario que dicho movimiento sea uniforme, basta que sea una función continua del tiempo y que sus ecuaciones sean integrables. Así surge el tiempo efemérico (TE), que se obtuvo a partir de los estudios sobre los movimientos del Sol, analizando las perturbaciones que influyen en él, realizados por Newcomb.

Fue instrumentado a partir del año 1960 y sustituido por el Tiempo Dinámico Terrestre (TDT) en el año 1984.

A partir de 1960 y hasta 1984, los anuarios publicaron sus efemérides astronómicas más importantes con argumento de tiempo de efemérides.

Es el tiempo utilizado en las teorías gravitacionales (teorías dinámicas del sistema planetario); se identifica con el "t" (tiempo uniforme) de la mecánica Newtoniana.

Segundo efemérico: 1/31556926 partes del año Trópico del 1900.

El origen del TE es el mediodía del 31 de Diciembre de 1899, cuando la longitud celeste del sol (λ_{sol}) valía 279°41'27",54

En la Mecánica Celeste, la longitud media geométrica "L" del Sol, referida al equinoccio medio de una cierta fecha, viene dada por la siguiente relación: $L = L_0 + L_1 \cdot t + L_2 \cdot t^2$

Dada la no uniformidad del tiempo universal, si tomamos éste como variable independiente en la fórmula anterior, la longitud media del Sol calculada mediante ella diferirá, cada vez más, de la deducida de las observaciones directas.

Así, el tiempo efemérico es el que figura en la fórmula de Newcomb:

$$L = 279^\circ 41' 27",54 + 129602768",13 \cdot t + 1",089 \cdot t^2$$

Según esta fórmula fue 0^h T.E. del 0^d de enero de 1900 cuando la longitud media del Sol era exactamente de 279° 41' 27",54; dicho instante difirió sólo en unos 4^s de la época 0^h T.U. del 0^d de enero de 1900. Tomando como unidad de tiempo de efemérides la duración del año trópico en 1900,0, esto permite deducir, a través del coeficiente de t, la duración del segundo efemérico (1/31556926 partes del año Trópico del 1900). ΔT fue nulo en el año 1903 y actualmente es del orden de +54^s.

Este segundo de efemérides es constante por definición y no experimenta variaciones con la rotación de la Tierra, como ocurría con el segundo de tiempo medio y la duración del día solar medio.

DELTA T (ΔT):

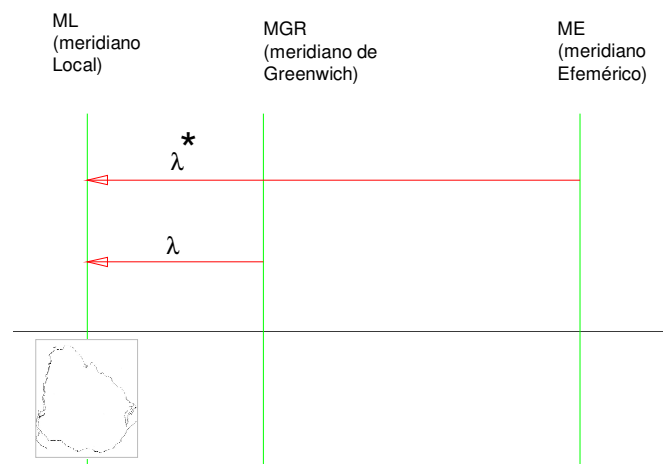
- se determina a partir de las observaciones, siendo las más importantes las correspondientes al registro de ocultamiento de las estrellas por la Luna.
- Nos permite comparar la correspondencia entre la escala de tiempo definida por el Tiempo Atómico Internacional y el movimiento de los cuerpos celestes.

MERIDIANO EFEMERICO:

Posición que tendría el meridiano de Greenwich (GR) si la Tierra hubiese girado uniformemente a partir del instante en que coincidieron el tiempo de efemérides y el tiempo universal, por lo que $\Delta T=0$.

$$\lambda^* = \lambda + (1.002738) \cdot \Delta T$$

Siendo $\Delta T = TE - TU$



⁽³⁾ http://www.publicacions.ub.es/liberweb/astronomia_esferica/material/version_html/tomo_1/4_10.htm.

Demostracion:

$$\underbrace{\alpha_{\text{sol}}(T+\Delta T)}_{\text{TE}} - \underbrace{\alpha(T)}_{\text{TU}} = 0.002738.\Delta T \quad (\text{Expresión de Newcomb})$$

$$\begin{aligned} \text{TE} = t_{\text{sol medio}}^{\text{ME}} + 12^{\text{h}} &\longrightarrow T + \Delta T = t_{\text{sol medio}}^{\text{ME}} + 12^{\text{h}} \longrightarrow t_{\text{sol medio}}^{\text{ME}} = T + \Delta T - 12^{\text{h}} \\ \text{TU} = t_{\text{sol medio}}^{\text{GR}} + 12^{\text{h}} &\longrightarrow T = t_{\text{sol medio}}^{\text{GR}} + 12^{\text{h}} \longrightarrow t_{\text{sol medio}}^{\text{GR}} = T - 12^{\text{h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta^{\text{ME}} &= \alpha(T + \Delta T) + t_{\text{sol medio}}^{\text{ME}} \longrightarrow \theta^{\text{ME}} = \alpha(T + \Delta T) + T + \Delta T - 12^{\text{h}} \\ \theta^{\text{GR}} &= \alpha(T) + t_{\text{sol medio}}^{\text{GR}} \longrightarrow \theta^{\text{GR}} = \alpha(T) + T - 12^{\text{h}} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \theta^{\text{ME}} &= \alpha(T + \Delta T) + t_{\text{sol medio}}^{\text{ME}} \\ \theta^{\text{GR}} &= \alpha(T) + t_{\text{sol medio}}^{\text{GR}} \end{aligned}} \right\} \text{restando}$$

$$\underbrace{\theta^{\text{GR}} - \theta^{\text{ME}}}_{\lambda^* - \lambda} = \underbrace{\alpha(T + \Delta T) - \alpha(T)}_{(0.002738).\Delta T} + \Delta T$$

$$\lambda^* - \lambda = (0.002738).\Delta T$$

$$\lambda^* = \lambda + (0.002738).\Delta T$$

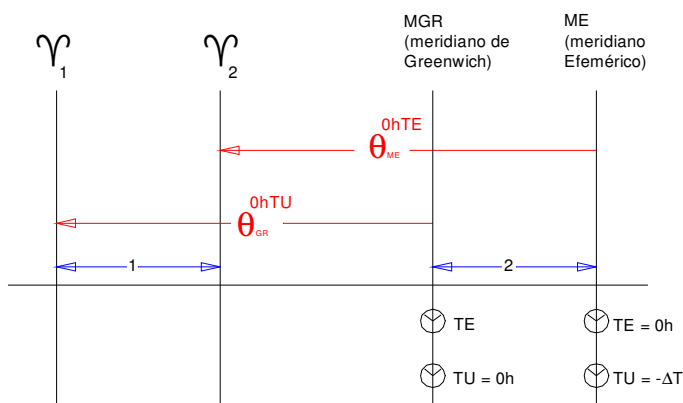
ECUACION DEL TIEMPO:

Ecuación del Tiempo a la 0h del Tiempo Efemérico:

$$E_t^{0\text{hTE}} = \theta_{\text{GR}}^{0\text{hTU}} + 12^{\text{h}} - \alpha_{\text{sol verdadero}}^{0\text{hTE}} \quad (1)$$

$$\theta_{\text{GR}}^{0\text{hTU}} = \theta_{\text{ME}}^{0\text{hTE}} \quad (2)$$

Mostracion (2)



Demostracion (1)

$$\begin{aligned}
 E_t^{0hTE} &= \alpha_{sol medio}^{0hTE} - \alpha_{sol v}^{0hTE} \\
 \Theta_{ME}^{0hTE} &= \alpha_{sol medio}^{0hTE} - t_{sol medio ME}^{0hTE} \\
 TE = t_{sol medio ME} + 12h &\longrightarrow 0h = t_{sol medio}^{0hTE} + 12h \longrightarrow t_{sol medio}^{0hTE} = -12h \\
 \Rightarrow E_t^{0hTE} &= \Theta_{ME}^{0hTE} + 12h - \alpha_{sol v}^{0hTE} \\
 \text{Por (2): } \Theta_{ME}^{0hTE} &= \Theta_{GR}^{0hTU} \\
 \Rightarrow E_t^{0hTE} &= \Theta_{GR}^{0hTU} + 12h - \alpha_{sol v}^{0hTE}
 \end{aligned}$$

La Ecuacion del Tiempo:

- Hasta el año 1984: $E_t^{0hTE} = \Theta_{GR}^{0hTU} + 12h - \alpha_{sol v}^{0hTE}$
- A partir del 1 de Enero de 1984, las tablas están definidas en función del Tiempo Dinámico Terrestre (TDT), por lo tanto la Ecuacion del Tiempo queda expresada de la siguiente manera:

$$E_t^{0hTDT} = \Theta_{GR}^{0hTU} + 12h - \alpha_{sol v}^{0hTDT}$$

Nota: Entre 1960 y 1984, las efemérides estaban referidas a las 0h del Tiempo Efemérico (TE).

CLASES DE TIEMPO UNIVERSAL (TU): ⁽⁴⁾

Como ya se vio anteriormente, la Rotación de la Tierra no es uniforme; algunas manifestaciones de ello son:

- la Tierra rota cada vez más lento, de tal forma que el día es ahora aproximadamente 16 milisegundos más largo que hace 1000 años
- las posiciones de los polos norte y sur varían año tras año y puede producir una discrepancia de hasta 30 milisegundos
- existen fluctuaciones regulares e irregulares en la inclinación de la Tierra y en su rotación que introduce hasta unos milisegundos por año.

Todos estos efectos contribuyen para que la Tierra se considere un reloj irregular y ha dado lugar al desarrollo ó definición de 4 escalas de tiempo que se denominan en forma genérica Tiempo Universal.

Tiempo medio de Greenwich ó Tiempo Universal como también se conoce, es el tiempo solar medio medido sobre el meridiano de Greenwich. Este se toma como la línea de longitud 0 grados.

El TU se determina a partir de observaciones astronómicas y geodésicas.

Las diferentes escalas de Tiempo Universal son:

- TU₀** es la escala de tiempo generada por el día solar medio. Así, TU₀ toma en cuenta la inclinación del eje de rotación de la Tierra y el movimiento de Traslación alrededor del Sol en una órbita elíptica.
- TU₁** es TU₀ tomando en cuenta el movimiento de las posiciones de los polos (nutación).

$TU_1 = TU_0 + \Delta\lambda_i$, siendo $\Delta\lambda_i$ las correcciones a aplicar por el movimiento de los polos geográficos, lo cual varía con el lugar.

- TU₂** es TU₁ tomando en cuenta la pequeña desaceleración y aceleración de la Tierra en las diferentes estaciones del año (en sus diferentes posiciones a lo largo de su órbita en torno al Sol).

$$TU_2 = TU_1 + \Delta S$$

$TU_2 = TU_0 + \Delta\lambda_i + \Delta S$, siendo ΔS la corrección por variación estacionaria.

⁽⁴⁾ **Astronomía Básica**, 2000, Fondo de Cultura Económica, México, D.F

$$TU_2 = TU_0 - [x.\text{sen}(\lambda) + y.\text{cos}(\lambda)].\text{tg}(\phi)/15$$

Expresión en segundos de tiempo, donde ϕ es la latitud, λ es la longitud del lugar, (x, y) coordenadas del polo instantáneo de rotación de la Tierra.

- **TUC** (TIEMPO UNIVERSAL COORDINADO) se basa (al igual que el TAI) en el segundo del SI, pero definido de forma que no difiera del UT_1 en más de 0,9 segundos. Para conseguirlo, se introducen correcciones de un segundo en el TUC a medida que las observaciones así lo aconsejan. Por ejemplo, se introdujeron esas correcciones en diciembre de 2005 y en diciembre de 2009. Se retransmite en las señales horarias y también se puede obtener de los receptores GPS. Las horas oficiales de los países se obtienen a partir de esta variante del Tiempo Universal.

Esta dado por las señales horarias, de tal manera que la diferencia entre dos señales consecutivas es igual a un segundo atómico.

Las diferencias entre el tiempo atómico y el tiempo universal son obtenidas por observaciones. En el año 2007, la diferencia entre TT y TU (denominado ΔT) es de 65 segundos aproximadamente.

$$\Delta TU = TU - TUC$$

Siendo ΔTU el incremento a agregar al TUC para obtener TU_0 .

El 1 de Enero y el 1 de Julio se corrigen las señales, por la diferencia entre el segundo astronómico y el segundo medio.

Dado que las irregularidades en la rotación de la Tierra son imprevisibles, se introducen otras escalas basadas en el tiempo atómico, las que describimos a continuación:

TIEMPO ATOMICO INTERNACIONAL (TAI):

Dado por los relojes atómicos (de gran precisión). Para asegurar dicha precisión se realizan comparaciones continuas de frecuencia entre los relojes.

La unidad del TAI, el segundo atómico, representa la primera unidad de tiempo que no se encuentra ligada a un fenómeno astronómico, a diferencia de las definiciones vistas anteriormente.

Los relojes basados en el átomo de cesio resultaron extremadamente precisos, contando el tiempo con un error inferior a un segundo por cada tres mil años. Debido a su altísima precisión, en 1967 se adoptó la definición actual de segundo, unidad de tiempo en el Sistema Internacional de Unidades (SI), basada en los relojes atómicos: un segundo es el tiempo que le toma a un átomo de cesio 133 vibrar 9.192.631.770 veces en un estado y condiciones concretas.

A partir de esta definición de segundo, apareció el llamado Tiempo Atómico Internacional (TAI), basado en el tiempo promedio de, aproximadamente, 150 relojes atómicos situados en 30 países.

Dada la conveniencia de tener un sistema de medición del tiempo que tenga, a la vez, las ventajas del tiempo atómico pero conserve la referencia de la rotación de la Tierra se creó en 1972 el Tiempo Universal Coordinado (UTC), como hemos visto antes. En éste, la duración del segundo es establecido por los relojes atómicos, pero los días están determinados por la rotación terrestre. Las señales de los relojes que, oficialmente llevan el Tiempo Universal Coordinado, son determinadas por la Oficina Internacional de Pesas y Medidas de París..



Reloj atómico de estroncio
Imagen: Universidad de Colorado

Entonces, ¿qué es un segundo atómico?

En un reloj atómico, el ritmo uniforme de un oscilador electrónico se mantiene estable en relación con la frecuencia natural de un átomo (comúnmente cesio 133). Cuando un átomo de cesio cae desde un nivel energético a otro, un fotón en el rango de microondas es emitido. El fotón, similar a una onda, oscila como un péndulo de un reloj antiguo. La luz que es visible a nuestros ojos (y también las ondas de radio, luz infrarroja, rayos ultravioleta, rayos X y rayos gama; a todo este conjunto de tipo de ondas se le conoce como el *espectro electromagnético*) está constituida por fotones, y lo que distingue a un tipo de "luz" es que tanta energía tienen esos fotones o equivalentemente con que frecuencia vibran. Así, cuando un fotón de microondas ha oscilado exactamente 9.192.631.770 veces (por decreto de la Decimotercera Conferencia General de Pesos y Medidas de 1967) un "segundo atómico" ha transcurrido. ⁽⁵⁾

⁽⁵⁾ <http://www.crya.unam.mx/web>

TIEMPO DINÁMICO TERRESTRE o TIEMPO TERRESTRE (TDT o TT):

Es el argumento de las efemérides geocéntricas aparentes de todos los astros teniendo como origen el baricentro de la Tierra.

La Unión Astronómica Internacional en el año 1991 acordó eliminar la palabra "dinámico" del Tiempo Dinámico Terrestre (TDT) y cambiar su denominación a Tiempo Terrestre (TT), que se mantiene con este nombre, como argumento de las efemérides geocéntricas aparentes.

$$\text{TDT} = \text{TAI} + 32^{\text{s}}, 184 \quad \text{o} \quad \text{TT} = \text{TAI} + 32^{\text{s}}, 184$$

El valor $32^{\text{s}}, 184$ se establece para evitar discontinuidades en las tablas de las Efemérides publicadas antes de 1984 cuyo argumento es el TE y las publicadas a partir del mismo año, cuyo argumento es el TDT. Dicho valor surge de las observaciones.

OBSERVACIÓN:

¿Por qué no utilizar siempre el TU/UTC en las efemérides astronómicas, en lugar del TT?

La diferencia entre TU/TUC y TT/TAI no se puede predecir con exactitud, y menos su evolución a largo plazo. Cuando no se requiere una gran precisión, las efemérides referidas a los tiempos actuales suelen utilizar el UT para dar los horarios, sin embargo para el futuro o para el pasado (exceptuando los últimos siglos) es conveniente emplear el TT, ya que no podemos conocer la diferencia UT-TT con suficiente precisión, y cuantos más siglos nos separemos del presente, más incertidumbre habrá.

TIEMPO DINÁMICO BARICÉNTRICO (TDB):

Corresponde al argumento de las efemérides de los cuerpos celestes de acuerdo a las teorías dinámicas del sistema planetario, teniendo como origen el baricentro de dicho sistema.

$$\text{TDB} = \text{TDT} + 0^{\text{s}}, 001658.\text{sen}(g + 0,0167 \text{ sen } g) + \text{términos lunares y planetarios de orden } (10^{-5})^{\text{s}} + \text{términos diarios de orden } (10^{-6})^{\text{s}}$$

Siendo g el valor de la anomalía media de la Tierra, $g = 2\pi \cdot (357^{\circ}, 528 + 35999^{\circ}, 050 \cdot T) / 360^{\circ}$, T = intervalo en siglos Julianos desde la época J 2000.0.

NOTACIONES:

$\Delta T = TE - TU$	Entre 1960 y 1984
$\Delta T = \text{TDT} - TU$	A partir del 1 de Enero de 1984
$\Delta TU = TU - TUC$	Correcciones: 1 de Enero: 1 segundo atómico y 1 de Julio: 1 segundo atómico
$\Delta TA = TAI - TUC$	Representa un numero entero de segundos.
$\Delta TE = TE - TUC$	
$\Delta TT = \text{TDT} - TUC$	
$\text{TDT} = \text{TAI} + 32^{\text{s}}, 184$	Donde $32^{\text{s}}, 184$ surge de las observaciones
Segundo efemérico	$1/31556925,975$ partes del año Trópico de 1900 (Newcomb) (Día = 86.400 segundos)
SI: segundo internacional	Intervalo de tiempo para el cual la frecuencia de radiación del cesio es $f=9192631,770$.